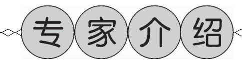
文章编号:1000-4939(2023)02-0241-12





刘人怀,中国力学家和管理学家,中国工程院院士。1940 年生于四川成都。1963 年毕业于兰州大学数学力学系。先后在兰州大学、中国科技大学、上海工业大学和暨南大学任教,1981 年作为中国首批洪堡学者在西德鲁尔大学留学。1999 年当选中国工程院机械与运载工程学部院士,2000 年当选中国工程院管理学部首批院士。曾任上海工业大学副校长兼经济管理学院首任院长,暨南大学校长,中国工程院机械与运载工程学部常委、工程管理学部副主任和首席咨询专家,教育部高校力学教学指导委员会主任,教育部科技委员会管理学部主任,中国振动工程学会理事长,中国力学学会副理事长和中国复合材料学会副理事长等职务。现兼任广东院士联合会会长和粤港澳院士专家创新创业联盟主席等职务。2022 年获得广东省授予的"广东最美科技工作者"称号。

刘人怀是我国板壳结构理论与应用研究开拓者之一,1965 年与叶开沅共同创立适于求解非线性微分方程的修正迭代法,系统创造性研究了 6 类典型板壳:波纹板壳、单层板壳、双金属板壳、夹层板壳、网格板壳和复合材料层合板壳,建立弯曲、稳定和振动的非线性理论,应用于航空航天、精密仪器仪表等工程设计。同时,创立的实用厚板壳理论,在压力容器等工程中得到应用。先后参加我国东方红第一颗人造地球卫星、神舟飞船、航空母舰歼 15 舰载机等科研项目。

此外,还致力于管理学方面的理论与应用研究,曾完成上海浦东新区建设等管理工程项目。截至 2022 年,共出版学术著作 15 部(力学 8 部,管理科学 7 部),主编著作 8 部(力学 1 部,管理科学 7 部),发表学术文章 625 篇(力学 203 篇,管理科学 422 篇)。

拓扑互锁结构研究现状及展望

习会峰[1,2],黄丽琴[1,2],余同希[3],刘人怀[1,2]

(1. 暨南大学力学与建筑工程学院,510632 广州;2. "重大灾害与控制"教育部重点实验室(暨南大学),510632 广州;
3. 香港科技大学机械与航天航空工程系,999077 香港)

摘 要:拓扑互锁是一种新兴的结构设计理念,因特别的构成和连接方式,具有较优的力学性能,包括杰出的结构韧性、抗裂纹延展及抗局部破坏能力、较好的能量吸收能力等,近年来在众多领域内引起广泛关注。很多学者对此展开多方面的创新研究,取得了很大进展。首先在性能特征方面,目前关于拓扑互锁材料在准静态变形过程中的力学性能的分析研究已经较为全面,结构动态响应的

收稿日期:2023-02-24 修回日期:2023-03-31
基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 12172151);广东省自然科学基金资助项目(No. 2020A1515011064)
通信作者:刘人怀,中国工程院院士。E-mail:lrh@jnu.edu.cn
引用格式:习会峰,黄丽琴,余同希,等. 拓扑互锁结构研究现状及展望[J]. 应用力学学报,2023,40(2):241-252.
XI Huifeng, HUANG Liqin, YU Tongxi, et al. A review on the studies of topological interlocking structures[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2023, 40(2):241-252.

分析也已有所开展;基于力学性能的研究,材料结构优化是近年研究的一个重点、正在系统化地完善之中;在工程应用方面,拓扑互锁结构在工程防护、航天材料、建筑设计、新型材料等一些领域都有应用研究,而且近年呈现出多元化、新颖有趣的趋势。本研究从拓扑互锁结构的优势特点、结构类型和应用等几个方面介绍近年来拓扑互锁结构国内外研究的进展及现状;在分析研究现状的基础上,也对拓扑互锁结构的未来发展趋势及可能拓展的工程应用进行了展望。

关键词:拓扑互锁;力学性能;优势特点;结构形式;应用前景

中图分类号:O34 **文献标志码**:A **DOI**:10.11776/j.issn.1000-4939.2023.02.001

A review on the studies of topological interlocking structures

XI Huifeng[1,2], HUANG Liqin[1,2], YU Tongxi[3], LIU Renhuai[1,2]

(1. School of Mechanics and Construction Engineering, Jinan University, 510632 Guangzhou, China; 2. MOE Key Lab of Disaster Forecast and Control in Engineering, Jinan University, 510632 Guangzhou, China; 3. Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Hong Kong University of Science and Technology, 999077 Hong Kong, China)

Abstract: Topological interlocking structures/materials is an emerging design concept. By the shape and size of the same blocks engaged with each other to form a structure with special properties, the elements are mutually constrained but not firmly bonded together, and which is called a topological interlocking structures/materials. Owing to its superior mechanical properties, such as outstanding toughness of structure, energy absorption capacity, resistance to local damage, and so on, it has received wider attention from more and more fields in recent years. Many researchers have carried out innovative studies on various aspects, so great research progress has been made in both theory and application. Its application covers many fields such as cushioning and damping, sound and energy absorption, and architectural design. This paper reviews the research progress and current status of topological interlocking structures/materials at home and abroad in recent years from the advantages, structure types and applications. Based on the analysis of the research status, this paper also looks forward to the future development trend and possible engineering applications of topological interlocking structures/materials.

Key words: topological interlocking; mechanical properties; advantages; structure form; applications

随着科学技术的发展,土木建筑、机械制造、航空航天和国防工业等诸多领域都在不断进行产业升级、技术革新,传统的材料或结构已经不能满足创新发展的需求;人们对材料性能的要求越来越高,科研人员也在不断探究具有更佳力学性能以及具有特定功能的结构和材料,因而对于具有特殊力学性能的超材料、仿生材料等研究和开发的关注度越来越高。表现出优异的缓冲吸能特性、具有抗局部破坏能力等特殊性能的拓扑互锁结构和材料[1-2]逐步进入人们的视野。

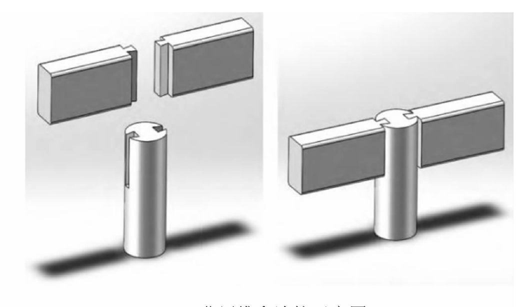
拓扑互锁这一概念最先由 DYSKIN 和 ESTRIN 在 2003 年提出[3],通过具有特殊形状的元素(块)彼此啮合拼接组成整体结构,在整体结构中各个元素之间相互约束且接触面无粘结,同时在结构边缘施加整体约束使其保持整体稳定性。与常见的整体式结构不同,拓扑互锁结构的破坏形式通常是中心元素破坏缺失,但整体上仍保持稳定。

拓扑互锁这种设计原理具有工程设计和仿生学设计上的双重意义。现代建筑和材料设计中,通常整体式的结构居多,整体与整体间以焊接、铆接、黏合剂粘接等方式连接。整体式结构是目前工程建设中最常见的结构,依靠材料自身的优异属性,获得较大的强度和刚度。相对整体式结构而言,拓扑互锁结构是离散型单元组合而成的结构,尽管这个概念在本世纪初才正式提出,但这样的设计理念在建筑和材料的历史上早有体现。从最早期的土石建筑、木结构建筑[4]到后来的砌体式结构,尤其是我国古代木质建筑常用的榫卯连接(图 1),就属于拓扑互锁的表现形式,其中的原理和拓扑互锁结构的设计理论十分相似,可以说拓扑互锁这一理念的应用远

远早于这一理论的系统研究。从时间的维度来看，拓扑互锁这一原理从古时延至今日，很大一部分古建筑经年不衰，至今依然保持完好，其中的结构设计理念值得我们借鉴，并加以创新利用。



(a) 故宫太和殿殿柱与额枋的榫卯连接

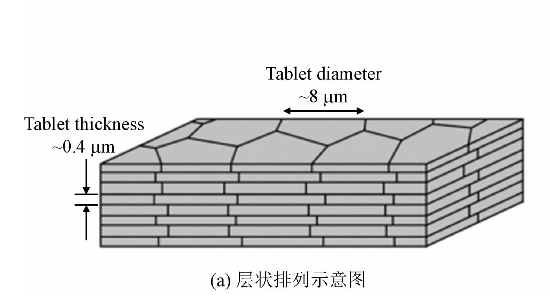


(b) 燕尾榫卯连接示意图

图 1　古建筑的榫卯连接

Fig. 1　The mortise and tenon connection of the historic building

拓扑互锁设计原理除了在工程建筑中有所体现以外，在自然界当中也不乏拓扑互锁结构的例子[5-6]，很多生物结构的形状构成及空间排列原则为自身提供了更多的灵活性和功能性，最典型的莫过于软体生物的外壳，贝壳珍珠层[7-8]的“砖泥结构”是其抗断裂特性的关键机制之一。除此之外，乌龟外壳[9]优异的几何拓扑结构和材料强度梯度分布特征使其具有良好的强度和较好的韧性，是一种非常优异的防护结构。受到这些结构的启发，目前学者们对拓扑互锁理论的研究与应用也产生了越来越多的创新点和突破，不仅仅是建筑工程[10-11]上的应用，在军事[12]、机械[13]、电子材料[14]等领域都有涉及，它对于一些领域所需的新型材料的研发大有裨益。



(a) 层状排列示意图

(b) 珍珠断口表面扫描电子显微结构

图 2　微观尺度的珍珠层[8]

Fig. 2　Nacre at the mesoscale[8]

近 20 年以来，随着 3D 打印技术和 CT 扫描技术的迅速发展，复杂形状单元的制造、功能性结构的布置以及微观尺度的结构研究有了进一步的创新和突破。相关学者围绕着拓扑互锁结构的力学性能进行了大量研究，逐步归纳出了拓扑互锁结构相对于一般整体式结构的性能优势，如优异的结构韧性[15]、杰出的吸能特性[16]、单元间抑制裂纹延展及出色的抗局部破坏能力[17]等，并由此衍生出一系列的应用。目前拓扑互锁结构在缓冲减震、隔音吸能[18]、复合结构[19]、建筑设计[20-21]等领域都取得了一定的研究成果。

1　拓扑互锁结构的特点及优势

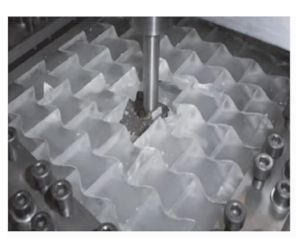
本世纪初，DYSKIN 和 ESTRIN[3,22-26]提出了一种新的材料设计概念，利用一定数量具有特殊形状和相同尺寸的单元相互啮合排列，装配成一种具有特殊性能的承载结构，由于其每一个子构件互相约束，使得结构不仅具有较大的承载能力，还具有一定的抗冲击能力，特别是能够阻止裂纹的产生与扩展，这种结构被称为拓扑互锁结构，此原理被称为拓扑互锁设计原理。拓扑互锁是近十年来受关注度越来越高的一个新兴结构设计理念，达到结构与材料的融合互补的效果。很多不同领域的学者后续展开了更多关于拓扑互锁结构性能与应用的研究，使得拓扑互锁结构逐步完善，并提出拓扑互锁结构的几点优势，下面一一展开论述。

1）各种材料制成的单元可以组合在一个拓扑互锁结构中，且结构具有易于组装和拆卸的特点。其中，结合拓扑互锁与复合材料结构的相关研究是近

年来的研究重点。一方面,拓扑互锁结构可以与仿生材料相结合研发出具有更优力学性能或是特定功能的复合材料;另一方面,拓扑互锁设计原理可以作为复合材料结构的界面增强策略,为提升复合材料性能提供新的途径[27]。

2)拓扑互锁结构的抗局部破坏能力强,且局部失效不会导致整体结构破坏。一个单元表面出现裂纹,毗邻的单元会限制其裂纹延展,进而抑制结构的整体性破坏。这一性质也是拓扑互锁结构所特有的,并且是具有其它性能的关键前提,最直接的体现便是拓扑互锁材料优异的抗局部破坏能力。DYSKIN等[28]通过有限元模拟,分析了在骨形元素随机破坏的情况下,整体结构能够抵抗单元的缺失破坏,且最高可承受近25%的单元块破坏,达到结构渗流极限状态;通过实验(图3)得出拓扑互锁组件只发生局部断裂单元缺失,而整体式构件则受到明显的破坏。

3)大部分拓扑互锁结构与整体板结构相比它的韧性和稳定性更好。在大多数情况下,拓扑互锁结构材料的韧性与抗冲击性能较强,但强度有所下降。因此,在设计一些具有特殊用途的拓扑互锁材料时,把握好这二者的平衡是未来优化研究的一个关键。不过在少部分结构中情况并非如此,MIRKHALAF等[29]分别在准静态和冲击条件下,测试了基于柏拉图形状及其截断版本设计的15种拓扑互锁建筑陶瓷面板的力学响应,结果显示在极限荷载作用下整体板结构破坏失效,而拓扑互锁陶瓷板只发生中心局部破坏,并且与整体式结构相比,八面体拓扑互锁组件的强度提高了近20%(图4)。此外,KHANDELWAL等[30]在研究中还发现,由四面体组成的蜂窝型拓扑互锁结构强度与韧性呈正相关关系。


(a) 骨形元素拓扑互锁组件

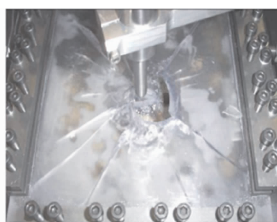
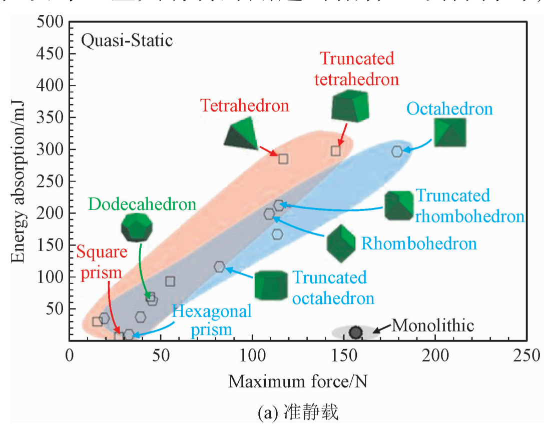
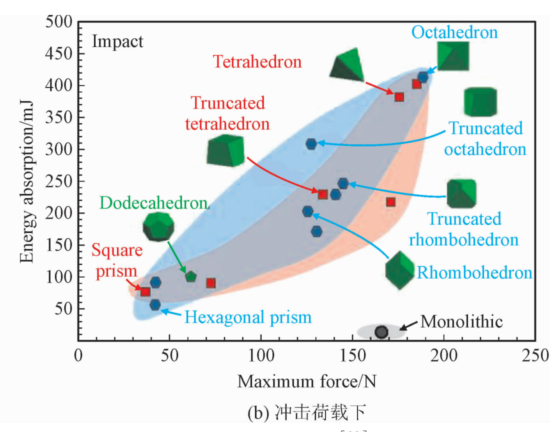

(b) 整体构件

图3 在集中力作用下相同材料不同结构形式的破坏[28]

Fig. 3 Fracturing of the samematerial in concentrated load tests[28]



(a) 准静载



(b) 冲击荷载下

图4 不同类型组件组装的陶瓷面板在准静态和动态载荷下的力学响应[29]

Fig. 4 Mechanical response of different types of ceramic panels assembled from topologically interlocked blocks[29]

4)拓扑互锁结构的能量吸收能力较强。在冲击荷载作用下,拓扑互锁结构的峰值荷载与整体实心结构相比有明显减小,具有较好的缓冲性能。这在很多的研究中都有体现,例如JAVAN等[31]对拓扑互锁混凝土砖制成的板状组件的冲击行为进行了数值分析,与整体板相比,由互锁砖制成的组装板的结构灵活性、能量吸收能力以及对局部破坏的耐受性都得到了改善。

5)拓扑互锁结构连接有可能代替传统的连接技术(如焊接、黏合剂和紧固件),有望构建"互锁超表面"。互锁超表面接触为机械接触,即可以和基材一样承受相同的热或化学暴露等,且不需要用焊接的焊缝承受支撑力,也不用另外使用螺栓等零件连接。如果设计巧妙,可以达到很好的连接,乐高搭建就是一个成功的范例。2021年有学者[32]参考乐高搭建的形式利用电脑自动设计出啮合家具。2023年,BOLMIN和YOUNG等[33]尝试设计平面和立体的连接形式,称为"互锁超表面"。

互锁超表面的连接表面通过机械连接,连接方式可以是线性啮合轨迹、平行滑动、复合或螺旋啮合轨迹(图5)。"互锁超表面"有很大潜在用途,比如太空组装,微型机器人,假肢,智能机器人关节,核辐射环境下设备互联或危险环境下电力传输中的互联等。

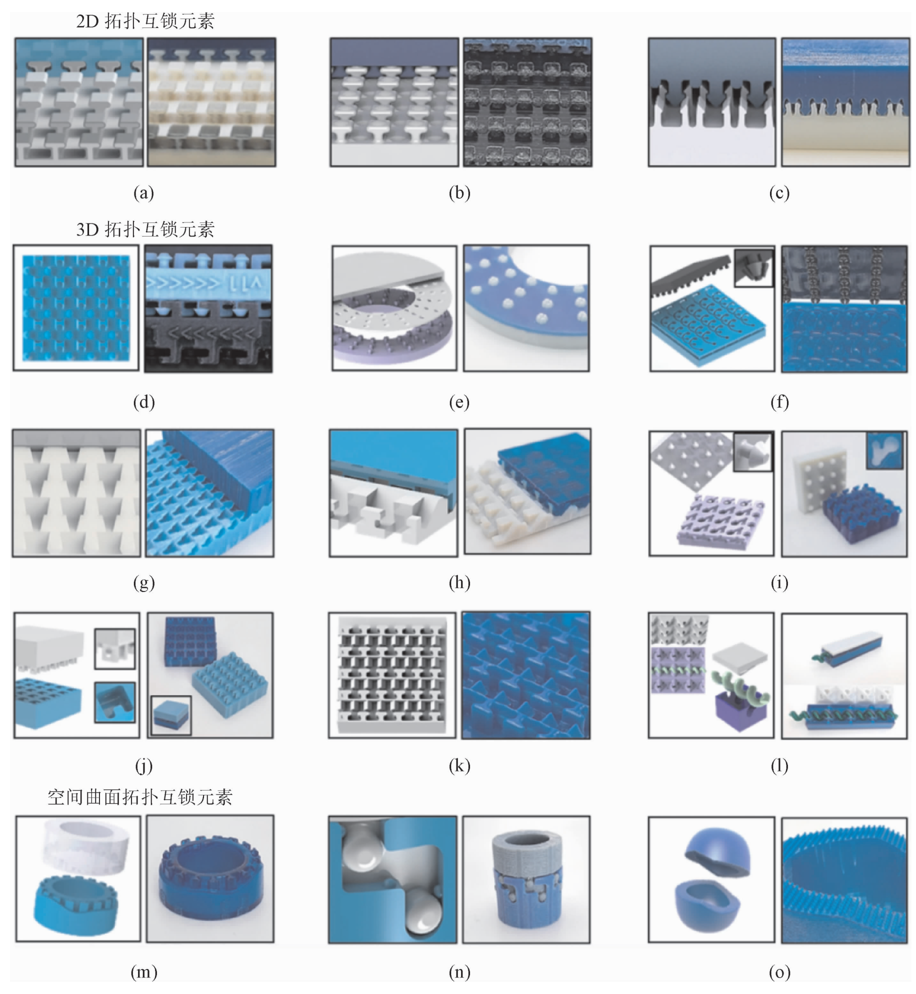


图 5　拓扑互锁超表面设计[33]

Fig. 5　Topological interlocking metasurface design[33]

除了以上这些特征以外,拓扑互锁结构的吸声性能也在研究中得到论证。CARLESSO 等[34]提出了一种通过将整体板分割成子构造块组合成拓扑互锁结构来消除噪声污染的新颖方法,并使用阻抗管和双麦克风技术进行了标准测试。结果表明,与同整体板相比,拓扑互锁结构的吸声系数显著增加。此外,在个别的拓扑互锁结构中也发现了负刚度特征,ESTRIN 等[35]在点荷载实验中发现,在立方体互锁组件中存在负刚度,这种现象的主要特征是在卸载时出现负刚度,这被证明是立方体组件的固有特性,与卸载时立方体元素发生旋转而改变的接触条件有关。

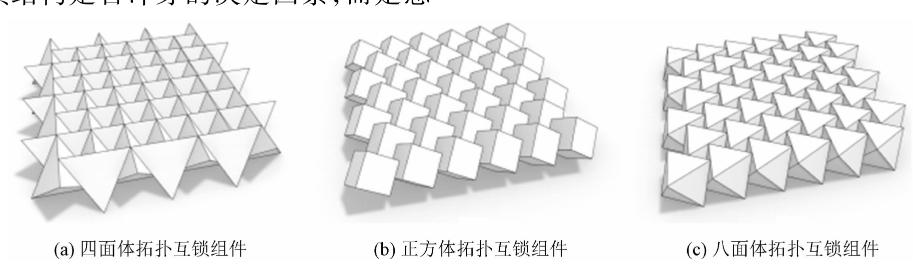
通过以上对拓扑互锁结构性能的综合分析,可以发现与普通整体式结构相比,拓扑互锁结构的性能发生明显的变化,拓扑互锁设计原理使得材料实现了由“硬”到“软”的改变,这也证明材料与结构设计是相互关联的,结构设计对改进材料性能有相当可观的效果;对它的这些优势及特点的探索为其后续的广泛应用奠定了基础,也为后续新型材料设计提供了新的思路。

2　常见的拓扑互锁结构类型

2.1　柏拉图体单元的拓扑互锁结构

在拓扑互锁结构设计方面,拓扑互锁的子单元从初期发展至今已变得更加丰富,早期的研究表明拓扑互锁结构对于形状为柏拉图体(柏拉图体主要指凸的多面体,包含四面体、立方体、八面体、十二面体和二十面体等)中的任何一个多面体及其衍生物[3,36-39]都可以组成拓扑互锁结构(图 6)。MIKHAIL 等[29]通过对多种柏拉图体拓扑互锁陶瓷板进行实验和仿真研究,确定八面体拓扑互锁结构与单片形式相比力学性能有显著优势,不仅其韧性提高了 50 倍,同时强度也提高了约 20%。除此之外,本课题组[40]研究发现,互锁角度和摩擦系数可

以有效地提高结构冲击承载能力和吸能能力，且速度不是拓扑互锁结构是否冲穿的决定因素，而是总能量的大小决定了拓扑互锁结构是否冲穿。



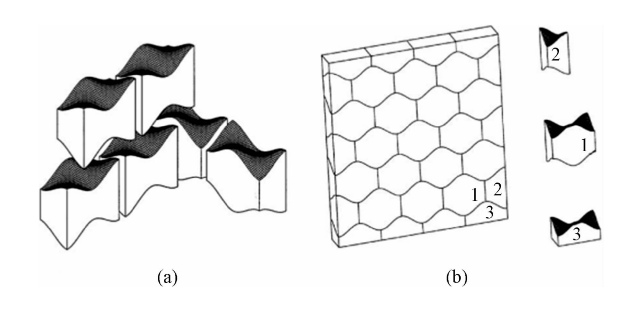
(a) 四面体拓扑互锁组件 (b) 正方体拓扑互锁组件 (c) 八面体拓扑互锁组件

图 6 柏拉图形元素拓扑互锁组件[38]

Fig. 6 Interlocking assemblies of Platonic solids[38]

2.2 骨形单元的拓扑互锁结构

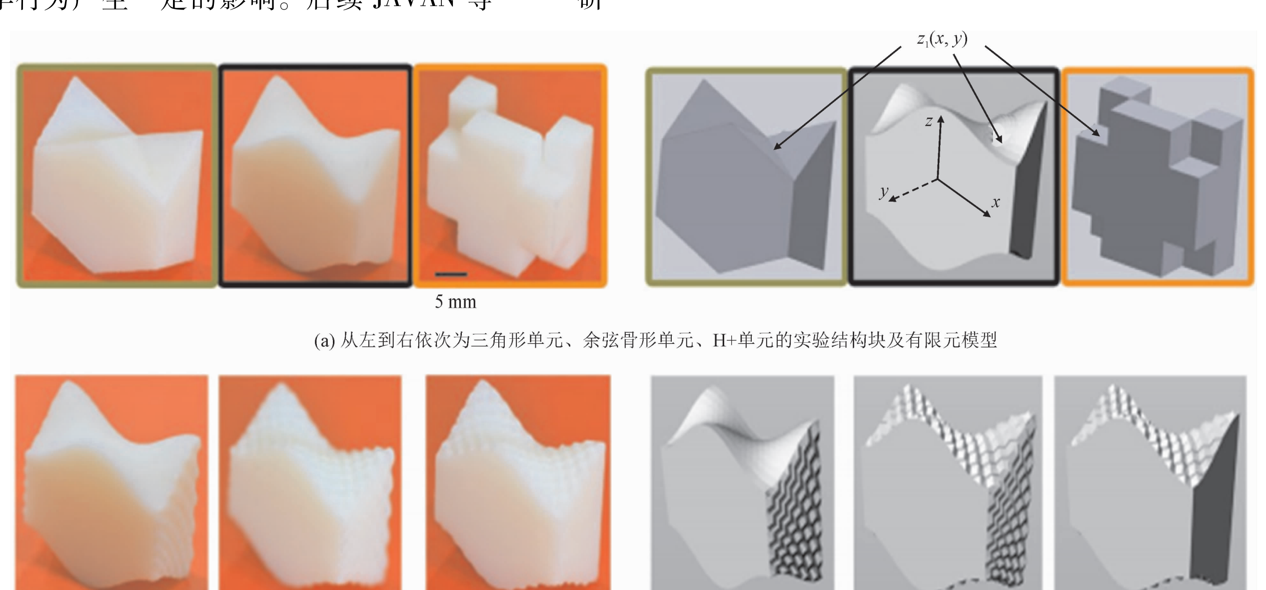
骨形单元块的拓扑互锁结构[24,28,41-42]（图 7）与多面体结构不同，它们依靠接触面的曲形形状与相邻单元啮合互锁，这种结构特别适用于脆性材料，因为与实心结构相比，骨形单元拓扑互锁组件单元的破坏不会直接导致整体破坏。相比柏拉图体结构，骨形结构的应用范围更广一些。有的学者也对骨形单元展开了优化，DJUMAS 等[43]将辅助几何曲面引入骨形单元的曲面（图 8），在新的长度尺度上创建附加的互锁效应，表面的二次互锁单元尺度细微到 1 ~ 2 mm，比骨形块尺寸小了一个数量级。研究结果表明多重拓扑互锁结构使结构承载能力、吸能能力和抗滑移能力等都有所提高，同时单元几何形状和接触表面轮廓等几何特征都会对拓扑互锁结构的力学行为产生一定的影响。后续 JAVAN 等[31,44-45]研究者在骨形结构块的基础上设计出新的曲形对称拓扑互锁单元（图 9），单元垂直平面的两个方向都是曲形轮廓；通过比较研究发现，这种新的结构比骨形块具有更好的吸能性能，由于其对称性，在冲击作用下应力分布更加均匀。骨形单元除了构成平板，还可以构成立体结构（图 10）。



(a) (b)

图 7 骨形单元拓扑互锁结构[24]

Fig. 7 Interlocking of osteomorphic blocks[24]



(a) 从左到右依次为三角形单元、余弦骨形单元、H+单元的实验结构块及有限元模型

(b) 作为制造和设计的独立块，具有各种层次交错的表面

图 8 不同函数轮廓的单元及表面处理后的双层拓扑互锁单元[43]

Fig. 8 Three kinds elements with different curvature of the contact surfaces and surface modification[43]

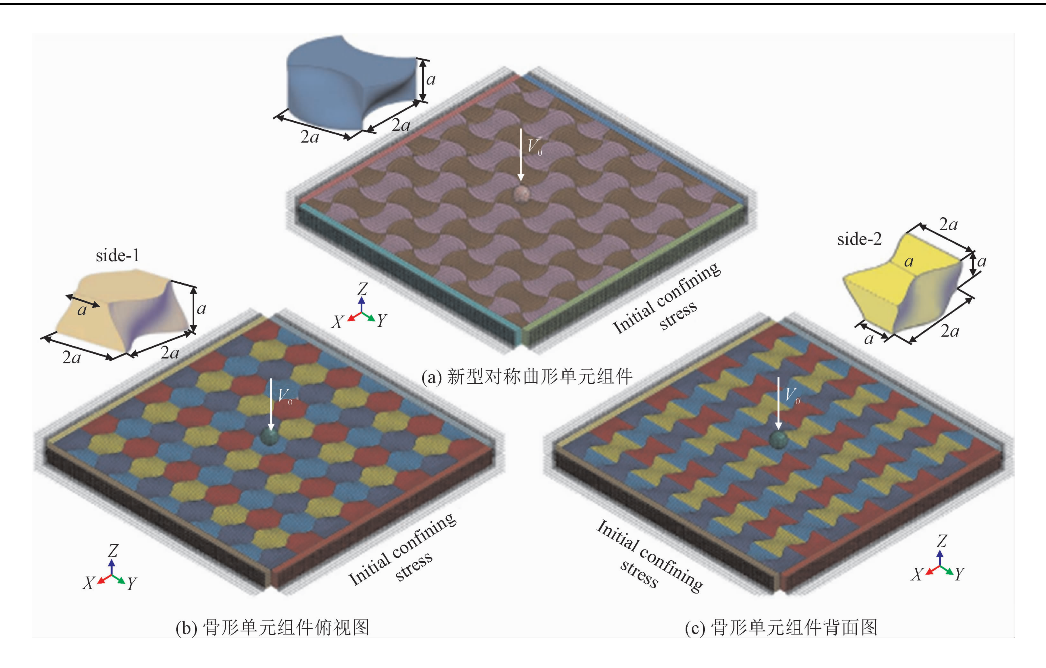


图 9　两种曲形单元拓扑互锁组件[44]

Fig. 9　The finite element models for assembly plates[44]

2.3　复合相拓扑互锁结构

结合仿生学的现有成果和对高性能复合材料不断增加的需求，将拓扑互锁与复合材料相结合的结构的研究已崭露头角。生物材料学的研究发现，贝壳珍珠质[46]由文石碳酸钙与层状有机质交叉堆叠构成“砖墙结构”具有优异的机械性能。MOLOTNIKOV 等[47]受贝壳珍珠层结构的启发，结合珍珠质的基本结构和离散硬质结构块的拓扑互锁，通过在一次构建的增材制造过程中在拓扑互锁的板块之间的接触面处添加软相材料，研究结果表明这样的处理可以进一步改善结构的力学性能。在复合材料结构的设计中，拓扑互锁设计原理可以作为一种创新的方式，使其具有更出色的性能。JAVAN 等[48]将拓扑互锁原理与复合材料设计理念相结合，对以橡胶为软界面的拓扑互锁混凝土砖制成的装配板的力学响应进行了研究。如图 10 所示，通过一系列准静态试验，比较了含软界面的互锁装配板与单体板和无软界面的互锁装配板的力学行为；结果表明，含软界面的复合材料装配板与未含软界面的装配板相比，其弯曲柔度较大，砖体损伤较小，而且其能量吸收能力会随着横向约束荷载增大而有所提高。

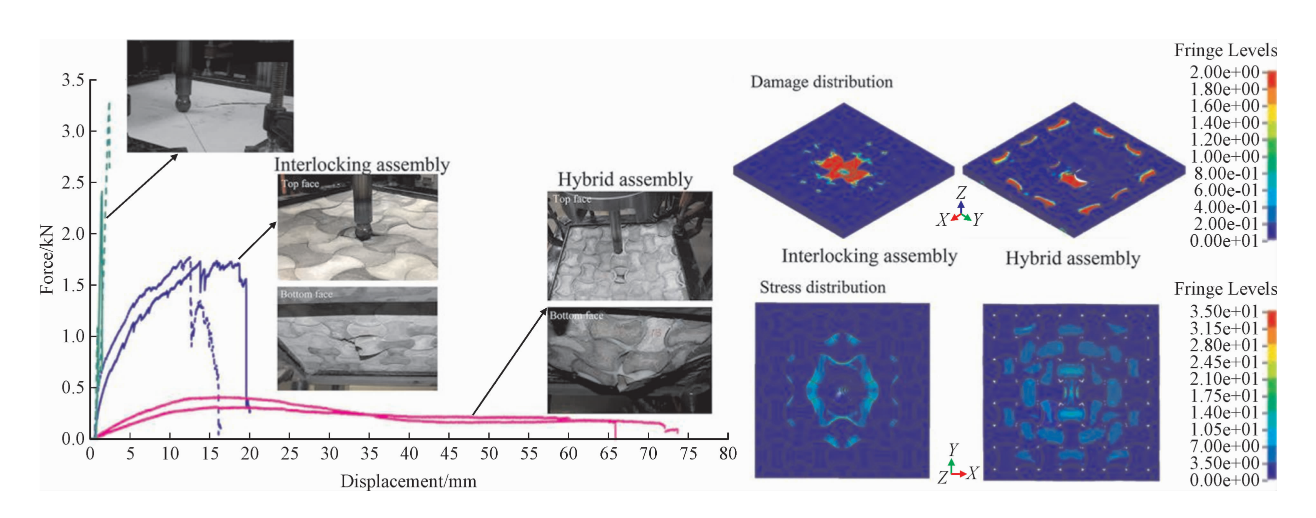


图 10　普通拓扑互锁组件与混合材料组件的实验和仿真结果[48]

Fig. 10　Experiment results and finite element analysis of topological interlocking assembly and hybrid assembly[48]

2.4 其它拓扑互锁结构

在给定空间撒布 Voronoi 位点,利用生长的几何原理,基于位点生长出自然结构元素,例如肥皂气泡、动物皮纹、叶脉、生物细胞等形态丰富的结构,此种生长模式可以用于结构设计。2020 年,AKLEMAN 和 KRISHNAMURTHY 等[49-50]受阿贝尔(Abille)拱顶和 Delaunay 阁楼的启发,利用高维 Voronoi 点(曲线和曲面)构造阿贝尔组件形成拓扑互锁结构(图 11)。本方法可以产生平面和立体结构,形成的立体结构有潜力取代现有的基于挤压的建筑块(如砖)。

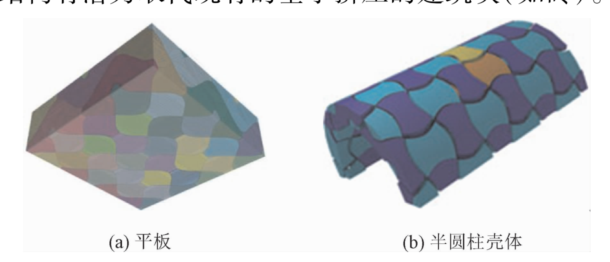


图 11 阿贝尔组件组成拓扑互锁结构[49-50]

Fig. 11 Topological interlocking of Abille[49-50]

此外,DJUMAS 等[43]在研究中将骨形单元的余弦函数用方形波函数取代,新设计一种拓扑互锁元素——“H+”型单元(图 8),与其他类型的单元相比,它表现出更好的抗滑移性能以及更高的峰值荷载。由于其抑制滑移的特点,在点荷载试验中,组件不经历软化阶段,最终中心单元直接发生脆性破坏。

曲形的拓扑互锁结构也是一种新的结构形式。如图 12 所示。WANG 等[41]研究规则排列的弧度刚性块的装配,近似地给定自由曲面,并定义了结构稳定性度量方法。

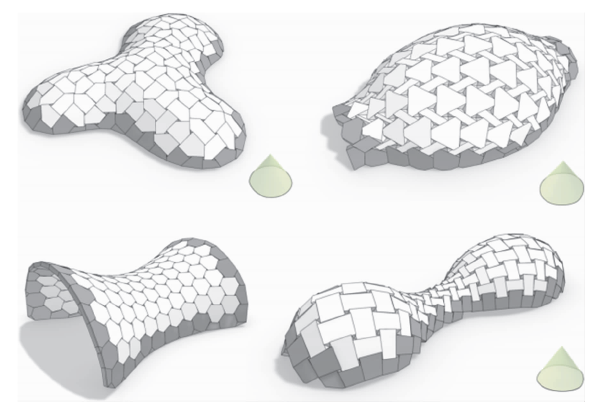


图 12 三维曲形拓扑互锁结构[41]

Fig. 12 Three-dimensional curved topological interlocking structure[41]

通过将几何模型参数化,优化块的几何形状以最大程度实现全局互锁,提高了结构稳定性。

总而言之,拓扑互锁单元是非常多样化的,存在较大的创新空间,引入 3D Voronoi 自动生成技术和机器学习等技术,开展拓扑互锁单元的设计,并系统地研究其形状、尺寸等对整体材料的力学性能影响,均具有重要意义。

3 拓扑互锁结构的应用

3.1 建筑设计方面的应用

拓扑互锁结构的早期实际应用大多在工程及建筑领域,研究人员利用拓扑互锁结构的性质将简单形状的单元组成拓扑互锁材料,以达到特定的工程目标。在建筑结构设计中,拓扑互锁原理其实早在中国古代和 17 世纪的西方的建筑中就开始有所体现。到了现代,它在建筑设计中的运用呈现多元化的趋势,融合了创新、美观、实用等元素。FALLACARA[10]和 TESSMANN[51]等学者的建筑设计作品或建筑研究中都体现了拓扑互锁这一理念(图 13)。ALOTHMAN 等[52]则设想将拓扑互锁结构应用至抗震建筑结构设计中。此外,镶嵌式结构建筑(TeSA)系统是通过相同的块体组合成棋盘式排列的建筑图案的结构,具有美观、可预制、重复利用等特点,例如 ROSS 等[11]对 TeSA 概念展开研究的同时尝试将拓扑互锁结构应用至其中,通过实验测试和有限元分析进行论证,该系统还具有潜在的弹性和可持续性优势,有望在进一步的研究和开发后投入建筑物中使用。



图 13 建筑设计中拓扑互锁的应用实例:悬链拱[10]

Fig. 13 Application examples of topological interlocking in architectural design: Osteomorphic Catenary Arch[10]

在水利工程方面,依据拓扑互锁结构设计原理,结合拓扑互锁结构弯曲刚度较小,能够抵抗较大的局部变形而不致整体破坏的特点,杨勇等[53]设计了

水泥土拓扑互锁材料，并对其力学特性进行了试验验证及分析。结果表明该材料在抗冲刷和整体连接方面有较好的性能且易于组装，便于后期的维护处理，可在进一步的研究后作为堤坝护坡衬砌材料投入使用。

3.2　新型材料设计在工程制造的应用

拓扑互锁结构设计理念也涉及到新型材料的应用，对同一种材料而言，拓扑互锁结构设计理念的加入会使得结构性能发生较大的改变。例如，早期 DYSKIN 和 ESTRIN 考虑到拓扑互锁结构耐热、耐冲击的优势，提出一种适用于航天飞机基片的瓷砖覆盖设计方法[36]，意在通过其特殊构成方式消除飞行器在极端条件下由于连接器产生应力集中和材料尺寸膨胀收缩等的影响。在兵工应用的背景下，利用拓扑互锁结构子元素间无黏结接触的特点，魏凤春等[54]提出一种新型易碎复合材料结构，它由许多子构件按拓扑互锁原理组合成一种可承载的整体结构，当受到外界撞击、约束被解除时整个结构即可散落，完成触发碎裂的工作机制；这种结构采用的复合材料具有较高的强度与抗断裂能力以及很好的韧性和抗冲击能力，能够应用在具有特殊功能性需求结构的领域中。MIRKHALAF 等[55]将拓扑互锁设计原理应用到玻璃中，以改变传统玻璃韧性低和抗冲击性能差的特点，有限元分析和实验结果表明尽管强度不及传统玻璃，但这种新型建筑玻璃板能够抵抗的冲击能量是普通玻璃的 2 到 4 倍左右。这项工作展示的制造策略为改变材料和结构的力学性能提供新的途径，同时也提出互锁角、界面粗糙度等作为未来拓扑互锁结构优化工作入手点的可能性，见图 14。

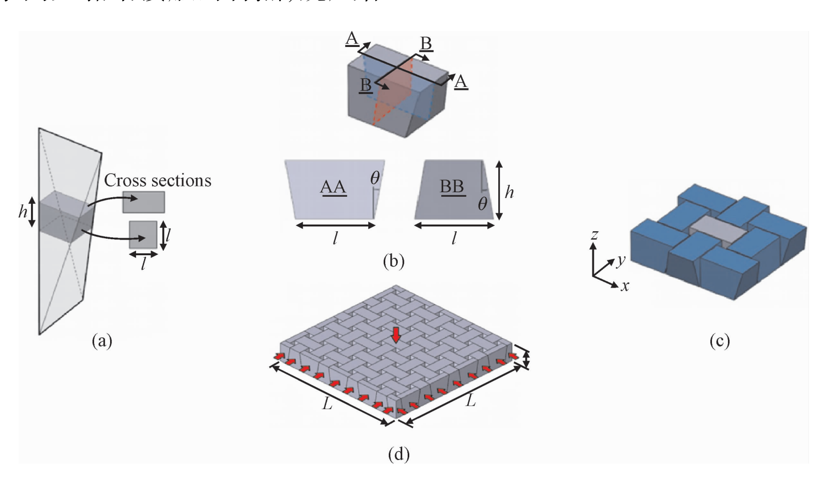


图 14　新型建筑玻璃[55]

Fig. 14　Architectured glass for building[55]

3.3　在电子设备等方面的工业应用

随着拓扑互锁理论研究的深入，拓扑互锁结构的应用也涉及到了更多创新领域，例如电子应用材料、触觉传感器等。受到壁虎脚和岩石裂缝中树根结构的启发，HUANG 等[14]提出了一种分层拓扑互锁界面增强策略的柔性对称微型超级电容器，这也是首次将拓扑互锁结构的研究深入到微米尺度；通过这些 3D 互锁结构，两个界面即活性材料/集电器和集电器/基板界面的有效接触面积和黏附强度都有显著提高，实现了高附着力、高柔性和高电容性能的微型电容器。高灵活性的触觉传感器因其在智能机器人、智能假肢、人机界面和生物监测电子设备等不同应用领域的巨大潜力而引起了人们的极大兴趣。基于石墨烯/银/硅橡胶复合材料，设计具有互锁的锯齿结构，开发出了一种高度灵活的触觉传感器，有望应用于智能机器人、假肢和可穿戴设备等[56]（图 15）。

除了以上的一些应用以外，拓扑互锁结构良好的吸声吸能性能、易组装拼接的特点等都有较好的应用前景，我们可以将拓扑互锁结构的优势与各类材料的性能特点灵活地结合起来，实现一些生产与生活中的新需求。

综上，拓扑互锁结构的研发设计及应用从最初较为单一发展至今，涉及领域广泛化，发展趋势多元化、创新化。

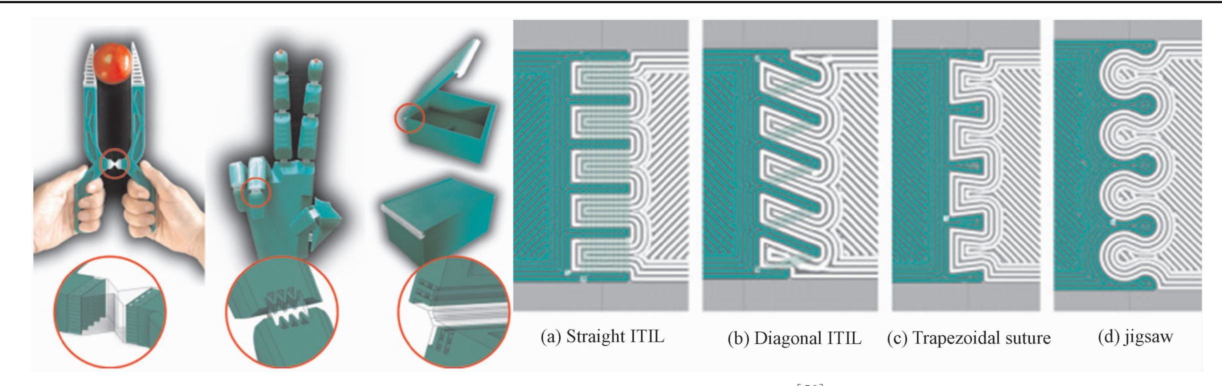


图 15 机器手关节处的拓扑互锁设计[56]

Fig. 15 A gripper making including interlocking design[56]

4 总结与未来发展趋势预测

总的来说,目前关于拓扑互锁结构的理论研究在力学性能的表征、单元设计优化等方面都获得了很大的进展,近来关于拓扑互锁设计原理的应用研究也更加趋于多元化。与仿生学的结合、与其它设计理念的相互借鉴融合等都推进了这一设计概念的创新发展,拓扑互锁结构设计已经成为解决材料科学和工程学所面临挑战的一种新途径。随着科技的进步,研究水平的不断提高,拓扑互锁结构的应用将日益广泛,相关的设计理念必将渗透到更多的领域中去。可以预期,与机器学习相结合,拓扑互锁材料的精准设计、智能制造和规模化生产装配等方面的探索将持续创造研究热点。

目前对拓扑互锁结构的研究大多为准静态过程分析,关于动态荷载与冲击作用下结构的强度、抗破坏能力、缓冲吸能等性能的实验测试和相关机理研究还具有一定的发展空间。另外,单元的形状、单元的大小、单元材质、单元间连接方式、平面和立体搭建形式等对拓扑互锁结构力学性能的影响需要进行系统理论分析,引入优化算法对结构进行更加精准有效的设计等也有待进一步完善。

可以预见的研究方向包括:第一,与拓扑互锁结构相关联的复合材料的研究,例如由生物结构启发的软硬结合多相拓扑互锁材料、三维互穿拓扑互锁材料等;第二,拓扑互锁结构与传统构件结合,例如拓扑互锁结构作为夹芯的板、梁、柱、非承重墙体结构等;第三,符合建筑美学特征、满足特定结构形状等需求的曲形拓扑互锁结构设计;第四,计算机自动设计拓扑互锁结构及连接部位也将成为一个热点。以上 4 个方面有可能成为后续高性能结构或材料设计研究的重点方向,并应用到防护工程、土木工程、机械制造、建筑设计、机器人等多个领域。

参考文献:

[1] DYSKIN A V,ESTRIN Y,KANEL-BELOV A J,et al. A new concept in design of materials and structures:assemblies of interlocked tetrahedron-shaped elements[J]. Scripta materialia, 2001, 44(12):2689-2694.

[2] GAO C,KIENDL J. Short review on architectured materials with topological interlocking mechanisms[J]. Material design & processing communications,2019,1(1):e31.

[3] DYSKIN A V,ESTRIN Y,KANEL-BELOV A J,et al. Topological interlocking of platonic solids:A way to new materials and structures[J]. Philosophical magazine letters,2003,83(3):197-203.

[4] 周乾. 紫禁城古建筑的传统防震方法[J]. 工业建筑,2019,49(6):210-217.
ZHOU Qian. Traditional aseismic methods of ancient buildings in the forbidden city[J]. Industrial construction,2019,49(6):210-217(in Chinese).

[5] NALEWAY S E,PORTER M M,MCKITTRICK J,et al. Structural design elements in biological materials:Application to bioinspiration[J]. Advanced materials,2015,27(37):5455-5476.

[6] PAL A,PICU C R. Stiffness percolation in stochastically fragmented continua[J]. Physical review letters,2017,119(8):085502.

[7] 赵赫威,郭林. 仿贝壳珍珠母层状复合材料的制备及应用[J]. 科学通报,2017,62(6):576-589.
ZHAO Hewei, GUO Lin. Synthesis and applications of layered structural composites inspired by nacre[J]. Chinese science bulletin,2017,62(6):576-589(in Chinese).

[8] BARTHELAT F,TANG H,ZAVATTIERI P D,et al. On the mechanics of mother-of-pearl:A key feature in the material hierarchical structure[J]. Journal of the mechanics and physics of solids,2007,55(2):306-337.

[9] 靳宏博,张志强,宋亮. 龟壳结构的力学性能研究现状及展望[J]. 力学与实践,2020,42(2):143-150.
JIN Hongbo,ZHANG Zhiqiang,SONG Liang. Areview of studies of mechanical properties of turtle carapace[J]. Mechanics in engi-

neering,2020,42(2):143-150(in Chinese).

[10] FALLACARA G,BARBERIO M,COLELLA M. Topological interlocking blocks for architecture:From flat to curved morphologies [M]//ESTRIN Y,BRÉCHET Y,DUNLOP J,et al. Architectured Materials in Nature and Engineering:Archimats. Cham:Springer International Publishing,2019:423-445.

[11] ROSS B E,YANG C C,KLEISS M C B,et al. Tessellated structural-architectural systems:Concept for efficient construction,repair, and disassembly[J]. Journal of architectural engineering,2020,26(3):04020020.

[12] 魏凤春,杨志宏,张娜,等. 拓扑互锁易碎复合材料结构研究[J]. 兵工学报,2008,29(12):1454-1457.
WEI Fengchun,YANG Zhihong,ZHANG Na,et al. Design and experiment for topological interlocking fragile composites structure [J]. Acta armamentarii,2008,29(12):1454-1457(in Chinese).

[13] 李韦翰. 冲破式复合盖结构设计与试验研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2012.

[14] HUANG C,KANG L,ZHANG N,et al. Bioinspired interfacial strengthening flexible supercapacitors via hierarchically topological interlocking strategy[J]. ACS applied materials & interfaces, 2019,11(41):38303-38312.

[15] KRAUSE T,MOLOTNIKOV A,CARLESSO M,et al. Mechanical properties of topologically interlocked structures with elements produced by freeze gelation of ceramic slurries[J]. Advanced engineering materials,2012,14(5):335-341.

[16] SCHAARE S,DYSKIN A V,ESTRIN Y,et al. Point loading of assemblies of interlocked cube-shaped elements[J]. International journal of engineering science,2008,46(12):1228-1238.

[17] BOUAZIZ O,BRÉCHET Y,EMBURY J D. Heterogeneous and architectured materials:A possible strategy for design of structural materials[J]. Advanced engineering materials,2008,10(1/2): 24-36.

[18] CARLESSO M,GIACOMELLI R,KRAUSE T,et al. Improvement of sound absorption and flexural compliance of porous alumina-mullite ceramics by engineering the microstructure and segmentation into topologically interlocked blocks[J]. Journal of the European Ceramic Society,2013,33(13/14):2549-2558.

[19] ZHANG Y M,YAO H M,ORTIZ C,et al. Bio-inspired interfacial strengthening strategy through geometrically interlocking designs [J]. Journal of the mechanical behavior of biomedical materials, 2012,15:70-77.

[20] WEIZMANN M,AMIR O,GROBMAN Y J. Topological interlocking in buildings:A case for the design and construction of floors[J]. Automation in construction,2016,72:18-25.

[21] LOING V,BAVEREL O,CARON J F,et al. Free-form structures from topologically interlocking masonries[J]. Automation in construction,2020,113:103117.

[22] DYSKIN A V,PASTERNAK E,ESTRIN Y. Mortarless structures based on topological interlocking[J]. Frontiers of structural and civil engineering,2012,6(2):188-197.

[23] DYSKIN A V,ESTRIN Y,KANEL-BELOV A J,et al. A new principle in design of composite materials:Reinforcement by interlocked elements[J]. Composites science and technology,2003,63(3/4): 483-491.

[24] DYSKIN A V,ESTRIN Y,PASTERNAK E,et al. Fracture resistant structures based on topological interlocking with non-planar contacts[J]. Advanced engineering materials,2003,5(3):116-119.

[25] DYSKIN A V,ESTRIN Y,KANEL-BELOV A J,et al. Toughening by fragmentation—how topology helps[J]. Advanced engineering materials,2001,3(11):885-888.

[26] ESTRIN Y,DYSKIN A V,PASTERNAK E. Topological interlocking as a material design concept[J]. Materials science and engineering:c,2011,31(6):1189-1194.

[27] KING D R,OKUMURA T,TAKAHASHI R,et al. Macroscale double networks:Design criteria for optimizing strength and toughness[J]. ACS applied materials & interfaces,2019,11(38): 35343-35353.

[28] MOLOTNIKOV A,ESTRIN Y,DYSKIN A V,et al. Percolation mechanism of failure of a planar assembly of interlocked osteomorphic elements[J]. Engineering fracture mechanics,2007,74(8): 1222-1232.

[29] MIRKHALAF M,ZHOU T,BARTHELAT F. Simultaneous improvements of strength and toughness in topologically interlocked ceramics[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,2018,115(37):9128-9133.

[30] KHANDELWAL S,SIEGMUND T,CIPRA R J,et al. Transverse loading of cellular topologically interlocked materials[J]. International journal of solids and structures,2012,49(18):2394-2403.

[31] REZAEE JAVAN A,SEIFI H,XU S,et al. The impact behaviour of plate-like assemblies made of new interlocking bricks:An experimental study[J]. Materials & design,2017,134:361-373.

[32] ZHANG Y N,KOGA Y,BALKCOM D. Interlocking block assembly with robots[J]. IEEE transactions on automation science and engineering,2021,18(3):902-916.

[33] BOLMIN O,YOUNG B,LEATHE N,et al. Interlocking metasurfaces[J]. Journal of materials science,2023,58(1):411-419.

[34] CARLESSO M,MOLOTNIKOV A,KRAUSE T,et al. Enhancement of sound absorption properties using topologically interlocked elements[J]. Scripta materialia,2012,66(7):483-486.

[35] ESTRIN Y,DYSKIN A V,PASTERNAK E,et al. Negative stiffness of a layer with topologically interlocked elements[J]. Scripta materialia,2004,50(2):291-294.

[36] DYSKIN A V,ESTRIN Y,KANEL-BELOV A J,et al. Interlocking properties of buckyballs[J]. Physics letters a,2003,319(3/4): 373-378.

[37] KANEL-BELOV A J,DYSKIN A V,ESTRIN Y,et al. Interlocking of convex polyhedra:Towards a geometric theory of fragmented solids[EB/OL].[2023-01-12]. https://arxiv.org/abs/0812.5089.

[38] DUGUÉ M,FIVEL M,BRÉCHET Y,et al. Indentation of interlocked assemblies:3D discrete simulations and experiments[J]. Computational materials science,2013,79:591-598.

[39] DYSKIN A V,ESTRIN Y,PASTERNAK E,et al. The principle of

topological interlocking in extraterrestrial construction[J]. Acta astronautica,2005,57(1):10-21.

[40] 黄丽琴,习会峰,李嘉轩,等. 拓扑互锁结构冲击防护研究及优化设计[J]. 力学季刊,2022,43(2):260-270.
HUANG Liqin,XI Huifeng,LI Jiaxuan,et al. Impact mechanics and optimization of topological interlocking structures[J]. Chinese quarterly of mechanics,2022,43(2):260-270(in Chinese).

[41] WANG Z Q,SONG P,ISVORANU F,et al. Design and structural optimization of topological interlocking assemblies[J]. ACM transactions on graphics,2019,38(6):193.

[42] BRUGGER C,BRÉCHET Y,FIVEL M. Experiments and numerical simulations of interlocked materials[J]. Advanced materials research,2008,47-50:125-128.

[43] DJUMAS L,SIMON G P,ESTRIN Y,et al. Deformation mechanics of non-planar topologically interlocked assemblies with structural hierarchy and varying geometry[J]. Scientific reports,2017,7(1):11844.

[44] REZAEE JAVAN A,SEIFI H,XU S,et al. Impact behaviour of plate-like assemblies made of new and existing interlocking bricks: A comparative study[J]. International journal of impact engineering,2018,116:79-93.

[45] JAVAN A R,SEIFI H,XU S Q,et al. Design of a new type of interlocking brick and evaluation of its dynamic performance[C]//Proceedings of IASS Annual Symposia,IASS 2016 Tokyo Symposium: Spatial Structures in the 21st Century-New Approaches,Materials & Construction Methods. Madrid,Spain: International Association for Shell and Spatial Structures (IASS),2016:1-8.

[46] 王胜男,竺鑫桥. 珍珠质文石板片的纳米结构与断裂行为[J]. 生物学杂志,2019,36(1):20-24.
WANG Shengnan,ZHU Xinqiao. Nanostructure and fracture behavior of aragonite tablet in nacre[J]. Journal of biology,2019,36(1):20-24(in Chinese).

[47] DJUMAS L,MOLOTNIKOV A,SIMON G P,et al. Enhanced mechanical performance of bio-inspired hybrid structures utilising topological interlocking geometry[J]. Scientific reports,2016,6(1):26706.

[48] REZAEE JAVAN A,SEIFI H,LIN X S,et al. Mechanical behaviour of composite structures made of topologically interlocking concrete bricks with soft interfaces[J]. Materials & design,2020,186:108347.

[49] KRISHNAMURTHY V R,AKLEMAN E,SUBRAMANIAN S G,et al. Geometrically interlocking space-filling tiling based on fabric weaves[J]. IEEE transactions on visualization and computer graphics,2022,28(10):3391-3404.

[50] AKLEMAN E,KRISHNAMURTHY V R,FU C A,et al. Generalized abeille tiles: Topologically interlocked space-filling shapes generated based on fabric symmetries[J]. Computers & graphics,2020,89:156-166.

[51] TESSMANN O,ROSSI A. Geometry as interface: Parametric and combinatorial topological interlocking assemblies[J]. Journal of applied mechanics,2019,86(11):111002.

[52] ALOTHMAN S,CHAVAN C. Topological interlocking systems for the construction of seismic-proof shell structures[C]//Proceedings of IASS Annual Symposia,IASS 2018 Boston Symposium: Shell structures. Madrid,Spain: International Association for Shell and Spatial Structures (IASS),2018:1-8.

[53] 杨勇,鲁立三. 基于拓扑互锁原理的铺设材料设计[J]. 人民黄河,2011,33(4):129-130.
YANG Yong,LU Lisan. Paving material design based on topological interlock principle[J]. Yellow river,2011,33(4):129-130(in Chinese).

[54] 魏凤春,张晓,杨志宏,等. 拓扑互锁易碎复合材料结构的设计与实验研究[J]. 机械强度,2009,31(4):573-577.
WEI Fengchun,ZHANG Xiao,YANG Zhihong,et al. Design and experiment for topological interlocking fragile composites structure[J]. Journal of mechanical strength,2009,31(4):573-577(in Chinese).

[55] MIRKHALAF M,TANGUAY J,BARTHELAT F. Carving 3D architectures within glass: Exploring new strategies to transform the mechanics and performance of materials[J]. Extreme mechanics letters,2016,7:104-113.

[56] KUIPERS T,SU R B,WU J,et al. ITIL: Interlaced Topologically Interlocking Lattice for continuous dual-material extrusion[J]. Additive manufacturing,2022,50:102495.

(编辑 黄崇亚 李坤璐)